УДК 621.311

ВЗАИМОСВЯЗЬ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ КОММУТАЦИОННЫХ АППАРАТОВ И ЭЛЕМЕНТОВ СХЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

Л.В. Кривова, А.В. Шмойлов

Томский политехнический университет
E-mail: faharlv@mail.ru

Предложено применение коэффициента взаимосвязи – определенным образом нормированной разности условной и безусловной вероятностей повреждения компонента схемы электрических соединений относительно других – для учета влияния компонентов схемы при их отказе на рассматриваемый объект.

При расчетах показателей надежности расчетного объекта (РО) в каждом из вариантов стоит задача учета влияния повреждаемости коммутационных аппаратов на показатели надежности РО. Вопрос о глубине повреждаемости коммутационных аппаратов путем последовательного развития аварии при этом в настоящее время до конца не решен. Рекомендации на этот счет в [1] предопределяют фактически итерационную форму ограничения глубины учета повреждаемости коммутационных аппаратов при заданной точности или степени влияния на показатели надежности РО. Например, если при учете повреждаемости коммутационных аппаратов, которыми РО непосредственно подключен к схеме, показатели надежности РО увеличиваются больше установленной нормы, то следует учесть повреждаемость следующего уровня коммутационных аппаратов, которыми подключены к схеме электрических соединений соседние к РО элементы и т.д., пока увеличение показателей не станет меньше заданной нормы. В [2] рекомендуется для ограничения влияния повреждаемости элементов на РО использовать коэффициент связи, который определяется произведением условных вероятностей повреждения каждого последующего компонента при повреждении предыдущего компонента, размещенных между интересующими элементами в направлении развития аварии. Как вероятность коэффициент связи принимает значения между нулем и единицей. Отыскание его нормированного значения для поставленной цели весьма проблематично, потому возможность его использования для расчета показателей надежности РО по-прежнему может быть оценена только итеративным путем.

Предлагается для целей учета влияния на показатели РО повреждаемости соседних элементов через коммутационные аппараты использовать коэффициент взаимосвязи [3], представляющий собой разность условной и безусловной вероятностей, например, события повреждения элемента схемы, отнесенной к некоторой нормирующей величине. Данный коэффициент в отличие от коэффициента связи имеет как бы естественное нормированное значение, равное нулю, после которого он становится отрицательным. Путем расчетов коэффициента взаимосвязи для типовых сетевых схем и распредустройств, а также итеративным путем можно подтвердить интересующее нормативное значение коэффициента взаимосвязи.

Пример расчета влияния повреждаемости соседних элементов и коммутационных аппаратов с использованием справочных данных показал довольно жесткую связь элементов с их коммутационными аппаратами (коэффициент взаимосвязи 0,02...0,4), с последующими элементами, подключенными через данные коммутационные аппараты, снижается до 0,01; со следующим уровнем коммутационных аппаратов становится близким к нулю 0,0001...0,005; а с более периферийными компонентами – отрицательным. Этот факт обосновывает известное практическое предложение учитывать в расчетах структурной надежности каскадное развитие повреждений в основном через последовательное повреждение двух коммутационных аппаратов. Ниже приведены выражения для расчетов величин коэффициента взаимосвязи, которые можно использовать при определении показателей надежности схем. Вопросы учета влияния дальних повреждений в сети на повреждаемость интересующего элемента при последовательном развитии аварии практически возникает, когда используются в качестве коммутационных аппаратов выключатели. Поэтому приводимые формулы будут касаться взаимосвязи элементов и выключателей, хотя принципиально они справедливы и для случаев использования отделителей и выключателей нагрузки.

Коэффициент взаимосвязи между элементом *эл* и выключателем (*эл–i*), соединяющим элементы *эл* и *i*:

$$s[эл,(эл-i)] = \frac{p[эл/(эл-i)] - p(эл)}{\left|p_э[эл/(эл-i)] - p(эл)\right|}, \quad (1)$$

где $p(эл)$ и $p[эл/(эл–i)]$ безусловная и условная (из-за повреждения выключателя (*эл–i*) вероятности аварийного простоя *эл*, $p_э[эл/(эл–i)]$ то же самое, что и $p[эл/(эл–i)]$, но экстремально-возможная по условиям нормирования, при этом:

$$p[эл/(эл-i)] = \begin{cases} 1 & \text{при } p[эл/(эл-i)] > 0 \text{ и } p(эл) > p(эл-i), \\ \dfrac{p(эл)}{p(эл-i)} & \text{при } p[эл/(эл-i)] < 0 \text{ и } p(эл) < p(эл-i), \\ 0 & \text{при } p[эл/(эл-i)] \le 0. \end{cases} \quad (2)$$

Вероятность $p(эл)$ определяется по выражению

$$p(эл) = k_a \omega^0_{эл} m(T''_{эл}) + \Delta\omega_{эл} m(T^{ов}_{эл}),$$

$\Delta\omega_{эл}$ – по выражению

$$\Delta\omega_{эл} = \sum_{i=1}^{n_i} \left\{ \begin{aligned} &\omega^0_{эл-i} + a_{эл-i} \times \\ &\times \left[\omega^0_i + \sum_{j=1}^{n_j} (\omega^0_{i-j} + a_{i-j}\omega^0_j) \right] \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

где n_i – число выключателей первого уровня, n_j – число выключателей второго уровня, подключенных к i-ому элементу $p[эл/(эл–i)]$ по выражению:

$$p[эл/(эл-i)] = \frac{p(эл)p[(эл-i)/эл]}{p(эл-i)} = \frac{p(эл)a_{эл-i}}{p(эл-i)},$$

вероятность аварийного простоя выключателя $p(эл–i)$ по выражению:

$$p(эл-i) = (2\omega^0_{эл-i} - \omega^д_{эл-i})m(T''_{эл-i}) +$$
$$+\left\{ \begin{aligned} &a_{эл-i}\left[\omega^0_i + \sum_{j=1}^{n_j}(\omega^0_{i-j} + a_{i-j}\omega^0_j)\right] + \\ &+a_{i-эл}\left[\omega^0_{эл} + \sum_{k\neq i}^{n_i-1}(\omega^0_{эл-k} + a_{эл-k}\omega^0_k)\right] \end{aligned} \right\} m(T''_{эл-i}),$$

где $\omega^0_{эл-i}$ и $\omega^д_{эл-i}$ – параметры потоков повреждений выключателя $(эл–i)$ в статическом состоянии и при оперативных переключениях, когда повреждаются одна из периферий с дугогасительной камерой выключателя (ДГК) и только ДГК, $a_{эл-i}$ и $a_{i-эл}$ – вероятности повреждения выключателя $(эл–i)$ при отключении повреждений соответственно на элементах i и $эл$, ω^0_i и $\omega^0_{эл}$ – собственные параметры потоков повреждений соответственно на элементах i и $эл$, n_i – число элементов, подключенных к элементу i, за исключением элемента $эл$, n_j – число элементов, подключенных к элементу j, за исключением элемента $эл$, ω^0_{i-j} – параметр потока повреждений выключателя $(i–j)$ в статическом состоянии и при оперативных переключениях, когда повреждается периферия с ДГК, обращенная к элементу i, $\omega^0_{эл-k}$ – то же самое для выключателя $(эл–k)$, но с повреждением периферии с ДГК, обращенной к элементу $эл$, a_{i-j}, $a_{эл-k}$ – вероятности повреждения выключателя $(i–j)$ при отключении повреждений на элементе j, выключателя $(эл–k)$ при отключении повреждений на элементе k, подключенном к элементу $эл$, ω^0_j, ω^0_k – собственные параметры потока повреждений соответственно на элементах j и k, $m(T''_{эл})$, $m(T''_{эл-i})$, $m(T^{ое}_{эл})$ – средние продолжительности аварийного ремонта элемента $эл$, выключателя $(эл–i)$, отсоединения от элемента эл его поврежденных выключателей, k_a – коэффициент неуспешности автоматического повторного включения элемента $эл$.

Коэффициент взаимосвязи между элементами $эл$ и i, соединенных выключателем :

$$s(эл,i) = \frac{p(эл/i) - p(эл)}{\left|p_э(эл/i) - p(эл)\right|},$$

где $p(эл/i) = \dfrac{p(эл*i)}{p(i)}$ – условная вероятность аварийного простоя элемента $эл$ при условии аварийного состояния элемента i, $p(эл*i)=[\omega^д_{эл-i}+a_{эл-i}(\omega^0_i+\Delta\omega_i)+ +a_{i-эл}(\omega^0_{эл}+\Delta\omega_{эл})]m(T''_{эл-i})$ – вероятность совместного поврежденного состояния элементов $эл$ и i, определяемая случаями повреждения ДГК выключателя в статическом состоянии и при оперативных переключениях (первое слагаемое), при отключении повреждения на объединяемых выключателем элементов $эл$ и i (второе и третье слагаемые).

Вычисление коэффициента взаимосвязи повреждаемости по выражению (1) между элементом и одним из его выключателей, может быть упрощено путем использования свойства инвариантности коэффициента взаимосвязи в отношении направления определения, т.е. $s[эл,(эл–i)]=s[(i–эл),эл]$.

Выражение для коэффициента взаимосвязи $s[(i–эл),эл]$ будет:

$$s[(i-эл),эл] = \frac{p[(i-эл)/эл] - p(i-эл)}{\left|p_э[(i-эл)/эл] - p(i-эл)\right|} =$$
$$= \frac{p[(i-эл)/эл] - p(i-эл)}{\left|\dfrac{p(i-эл)}{p(эл)} - p(i-эл)\right|}. \quad (4)$$

Сопоставление (1) и (4) показывает, что отпадает необходимость вычисления условной вероятности $p[(i–эл)/эл]$, т.к. она является вероятностью повреждения выключателя $a_{i-эл}$ при отключении повреждений на элементах, которая задается в справочной литературе.

Преимущество вычисления коэффициента взаимосвязи между выключателем и элементом по выражению типа (4) по сравнению с выражением (1) в большей степени сказывается, если между интересующим выключателем и элементом размещено несколько промежуточных выключателей в сети. В этом случае условная вероятность повреждения рассматриваемого выключателя при условии, что поврежден элемент, вычисляется путем перемножения справочных вероятностей повреждения всех промежуточных выключателей, включая рассматриваемый, т.е.

$$p\{[i-(i-1)]/эл\} = a_{i-(i-1)}a_{(i-1)-(i-2)}...a_{2-1}a_{1-эл}.$$

Например, для коэффициента взаимосвязи между выключателем $(i–j)$ и элементом эл при наличии промежуточного выключателя $(i–эл)$ по выражению (4):

$$s[(j-i),эл] = \frac{p[(j-i),эл] - p(j-i)}{\left|p_э[(j-i),эл] - p(j-i)\right|}$$

– условная вероятность повреждения выключателя $(i–j)$ второго уровня (пояса) относительно поврежденного элемента эл будет произведением двух вероятностей повреждения $p[(j–i)/эл]=a_{j-i}a_{i-эл}$.

Экстремальное значение этой же вероятности $p_э[(j–i)/эл]$ для целей нормирования коэффициента взаимосвязи при этом определяется аналогично (2) несложным выражением $p_э[(j–i)/эл]=p(j–i)/p(эл)$,

если $p[(j–i)/эл]=p(j–i)>0$ и $p(j–i)<p(эл)$, причем это значение во многих случаях будет мало отличаться от значений аналогичных экстремальных значений, например, от $p_э[(i–эл)/эл]=p(i–эл)/p(эл)$.

Если обсуждаемый коэффициент взаимосвязи определить при обратном порядке аргументов, т.е. по выражению

$$s[эл,(i-j)] = \frac{p[эл/(i-j)] - p(эл)}{\left|p_э[эл/(i-j)] - p(эл)\right|},$$

то условная вероятность будет вычисляться по выражению $p[эл/(i-j)] = \dfrac{p[эл*(i-j)]}{p(i-j)}$, причем вероятность совмещения повреждений интересующих элемента *эл* и выключателя *i–j* необходимо вычислять по конкретной схеме их соединения. В конкретном случае примера данная вероятность совмещения определится совместным повреждением трех элементов *эл*, *i*, *j* и двух выключателей (*эл–i*), (*i–j*) повреждением перемычки из трех элементов, показатели которой могут быть найдены с помощью выражений типа:

$$\omega^{pn3} = a_{3-2}(a_{2-1}\omega_1^0 + \omega_{2-1}^{\partial}) +$$
$$+a_{1-2}(a_{2-3}\omega_3^0 + \omega_{2-3}^{\partial}) + a_{3-2}a_{1-2}\omega_2^0,$$

а вероятность аварийного простоя перемычки как аварийного простоя РО:

$$p^{pn3} = \omega^{pn3} m(T''_{pn3})^p,$$

где $m(T''_{pn3})^p = \begin{Bmatrix} m(T''_1), m(T''_2), m(T''_3), m(T_1^{ш}), \\ m(T_2^{ш}), m(T_3^{ш}), 0{,}5m(T_{cx}^{pv}) \end{Bmatrix}.$

Экстремальное значение вероятности аварийного простоя для рассматриваемого случая может быть определено по выражению (2).

Таким образом, определение коэффициента взаимосвязи последним способом с направлением аргументов на первом месте повреждаемость элемента, а на втором – выключателя требует дополнительных вычислений, часть из которых (показатели перемычки из трех элементов) весьма объемна.

Поэтому во всех случаях, когда необходимо найти коэффициент взаимосвязи по повреждаемости между элементом и выключателем, следует использовать формулу этого коэффициента с направлением аргументов на первом месте повреждаемость выключателя, а на втором элемента. В случае определения коэффициента взаимосвязи между повреждаемостями двух элементов подобной рекомендации дать нельзя.

На рисунке представлены значения коэффициентов взаимосвязи S(A,D) для трех компонентов А: трансформатора (пунктир), секции (сплошная линия), линии (штрих-пунктир). На оси абсцисс обозначены компоненты (элементы и коммутационные аппараты) D в порядке удаления вглубь схемы. Графическое изображение коммутационных аппаратов на оси представлено в виде квадратных скобок, а элементов между ними в виде горизонтальной фигурной скобки, охватывающей данный элемент. Обозначения компонентов D: О – отделитель, В – выключатель, Т – трансформатор, С – секция, Л – линия.

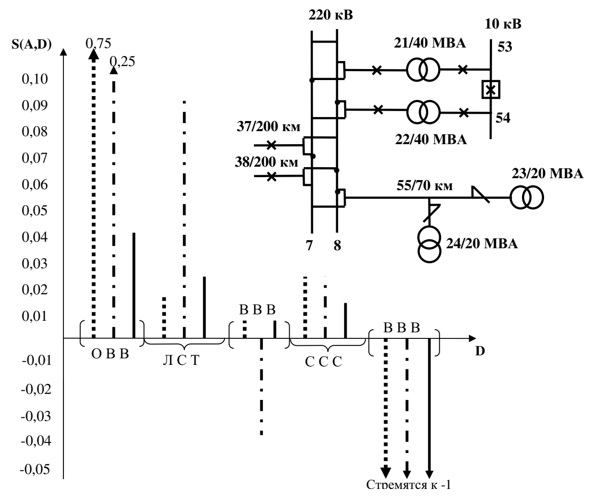


Рисунок. *Коэффициенты взаимосвязи для трех компонентов фрагмента схемы*

Из рисунка видно, что коэффициент взаимосвязи элемента А с первыми тремя компонентами D в порядке удаления имеет тенденцию непрерывного уменьшения. Однако, при оценке взаимосвязи на связи с четвертым компонентом, которым является секция, имеет место нарушение названной тенденции в виде выброса. Расчеты и анализ показывают, что подобные выбросы имеют место также при дальнейшем удалении компонентов в глубь схемы относительно элемента А, если таким компонентом является секция. В целом же тенденция к уменьшению коэффициента взаимосвязи с удалением друг от друга компонентов А и D сохраняется, и выбросы, обусловленные секциями, имеют место на фоне отрицательных, в том числе близких к отрицательной единице, значениях коэффициента взаимосвязи.

Количественный анализ показал, что выбросы обусловлены более высокой надежностью секции по сравнению с другими компонентами. Коэффициент взаимосвязи менее надежного с более надежным относительно возрастает, а более надежного с менее надежным наоборот относительно уменьшается. Более повреждаемый элемент связан более сильно с менее повреждаемым. Поэтому повреждение надежного элемента более достоверно распространится на ненадежный элемент, и наоборот. Этот принцип используется в практике отвлечения негативных возмущений (повреждения, аварийной потери, отказа) от интересующих объектов путем окружения их компонентами более восприимчивыми к негативным возмущениям (молниеотводы, предохранители, защитное отключение, разрядники). Более повреждаемые элементы схемы являются как бы такими компонентами, которые отвлекают повреждения от более надежных.

Следовательно, при расчете дополнительных параметров потока повреждения элементов за счет повреждения коммутационных аппаратов, следовало бы ожидать эффекта снижения этого дополнительного показателя, если распространение повреждения идет от весьма часто повреждаемого элемента, и наоборот, эффекта повышения дополнительного показателя, если распространение повреждения идет от менее часто повреждаемого компонента. Другими словами, влияние повреждения высоконадежного элемента на дополнительную повреждаемость интересующего объекта через последовательное распространение повреждаемости коммутационных аппаратов должно учитываться с большим удельным весом, по сравнению с влиянием повреждения менее надежного элемента. Анализ показывает, что значения коэффициента взаимосвязи между интересующим объектом и поврежденным элементом в схеме никак не противоречит функция названного удельного веса. То есть значения дополнительного параметра потока интересующего объекта (элемента) за счет повреждения выключателя следует умножать на значения коэффициента взаимосвязи между интересующим и другими компонентами в схеме, находящихся на различном удалении относительно интересующего объекта. Следовательно, формула (3) должна быть уточнена в виде:

$$\Delta\omega_{эл} = \sum_{i=1}^{n_i} \{s(эл, эл-i)\omega^0_{эл-i} + a_{эл-i}[s(эл,i)\omega^0_i + \\ + \sum_{j=1}^{n_j} (s(эл, i-j)\omega^0_{i-j} + a_{i-j}s(эл,j)\omega^0_j)]\}.$$

Причем при распространении повреждаемости на отдаленные компоненты удельные веса в виде коэффициентов взаимосвязи могут быть отрицательными и, таким образом, составляющие с такими удельными весами будут уменьшать дополнительный параметр потока повреждаемости $\Delta\omega_{эл}$. С удалением вглубь схемы повреждаемых компонентов, их вклад в $\Delta\omega_{эл}$ расчетного элемента снижается, однако не в той степени, как это было бы с учетом коэффициента связи [2]. Более того, при повреждаемости на удаленной периферии дополнительный параметр потока повреждаемости с учетом коэффициента взаимосвязи становится отрицательным и учет этой повреждаемости обусловливает некоторое снижение показателя повреждаемости расчетного элемента. Анализ и расчеты показывают, что применение коэффициента взаимосвязи наиболее логично и естественно позволяет учесть влияние периферии на повреждаемость расчетного компонента схемы. При этом не накладывается никаких ограничений или условий на глубину периферии, в том числе при повторных циклах, указанных в кольцевых и сложнозамкнутых сетях. Естественное ограничение глубины периферии может быть использовано по достижению коэффициентом взаимосвязи отрицательной единицы. Следовательно, коэффициент взаимосвязи, в отличие от других критериев, наиболее адекватно учитывает зависимость повреждаемости расчетных объектов от повреждаемости периферийных компонентов и не требует установления искусственных нормированных значений.

Выводы

1. Коэффициент взаимосвязи, примененный для обоснования степени влияния на показатели надежности компонентов схемы электрических соединений через последовательно развивающуюся повреждаемость коммутационных аппаратов от очага на периферии в направлении к интересующему элементу,
   - выявил не учитываемое ранее свойство надежности систем элементов, объединенных коммутационными аппаратами, состоящее в эффекте отвлечения повреждаемости интересующих компонентов вследствие повреждаемости других компонентов;
   - позволил произвести учет степени отвлечения повреждаемости интересующих компонентов за счет повреждаемости других компонентов через коммутационные аппараты, используя коэффициент взаимосвязи как множитель к дополнительным параметрам потоков повреждения интересующего компонента за счет повреждения коммутационных аппаратов;
   - подтвердил интуитивно принятую для практических расчетов надежности схем электрических соединений последовательную повреждаемость коммутационных аппаратов в количестве, как правило, не более двух.
2. Наиболее эффективно применение коэффициента взаимосвязи в сложных сетях, т.к. не требует анализа их топологии.
3. Отрицательный коэффициент взаимосвязи свидетельствует о повышении запаса надежности на периферийных компонентах при повреждениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Синьчугов Ф.И. Расчеты надежности схем электрических соединений. – М.: Энергия, 1971. – 198 с.
2. Фокин Ю.А., Туфанов В.А. Оценка надежности систем электроснабжения. – М.: Энергоиздат, 1981. – 224 с.
3. Шмойлов А.В. Моделирование вероятностно-статистической взаимосвязи // Моделирование энергетических систем: Тез. докл. X научной конф. – Каунас, 1991. – С. 163–165.